

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Манічева Наталя Віталіївна



УДК 616-72, 616-74

**СТРУМИННІ АКУСТИЧНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ
ДЛЯ БІОМЕДИЧНОЇ АПАРАТУРИ**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі загальної та медичної фізики Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор,
Дудзінський Юрій Михайлович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри загальної та медичної фізики
навчально-наукового інституту медичної інженерії

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Злепко Сергій Макарович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри біомедичної інженерії

доктор технічних наук, професор
Аврунін Олег Григорович,
Харківський національний університет радіо-електроніки,
завідувач кафедри біомедичної інженерії

Захист відбудеться «12» березня 2019 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. № 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «6» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19



В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Акустичні засоби та ультразвукові технології знаходять все більше застосування в медичних приладах, біологічній апаратурі, фармацевтичних виробництвах, біологічних та харчових технологіях. Зокрема, широко використовується явище розриву суцільності середовища в рідині (акустична та гідродинамічна) та супутні ефекти, що можливо при застосуванні в хірургічній апаратурі та в медичних вимірювальних приладах.

Акустична кавітація – явище розриву суцільності середовища, знаходить також широке застосування для очищення медичного інструменту від технологічних (на стадії виробництва) та експлуатаційних (після операцій та фізіологічних процедур) забруднень; для оброблення фармацевтичних і біоматеріалів. У фармакології, біотехнологіях та при виробництві харчових добавок застосовують дрібнодисперсне диспергування твердих та емульгування рідинних і аморфних речовин в рідинній фазі разом з гомогенізацією емульсій та суспензій для поліпшення властивостей і тривалого їх зберігання.

При очищенні медичного обладнання від забруднень традиційно використовують мийні розчини, які надають руйнівний вплив на поверхневий шар робочої поверхні або електроакустичні перетворювачі (ЕАП), що створені на базі магнітострикторів та п'єзокераміки, які ефективні лише на високих частотах, оскільки на низьких вони мають малий коефіцієнт корисної дії (ККД), а через великі габарити та масу їх недоцільно використовувати на частотах менш як 1 кГц. Крім того, для цього типу джерел звуку характерні резонансна амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) та висока добротність, а збільшення смуги робочих частот призводить до значного зниження інтенсивності звуку.

Застосування ЕАП у звукових та ультразвукових технологіях призводить до істотного подорожчання готового продукту внаслідок високої вартості обладнання, особливо ультразвукового генератора високої потужності. Цей фактор, ймовірно, є основною причиною недостатнього використання можливостей акустичних технологій.

Вельми перспективними низькочастотними джерелами акустичних полів високої інтенсивності є струминні гідродинамічні випромінювачі (ГДВ), які об'єднують в собі корисні властивості традиційних ЕАП: низькі робочі частоти, широка смуга робочих частот, висока інтенсивність генерованих хвиль, простота в експлуатації. Над удосконаленням ГДВ та розробкою нових засобів регулювання їх вихідних параметрів працювали провідні українські та зарубіжні вчені: В.Ф. Юдаєв, Д.А. Гершгал, Ф.Ф. Черножуков, Н. Hagedorn, E.G. Richardson, A.B. Кортнев, Ши-Го-Бао, А.Ф. Назаренко, Ю.М. Дудзінський, О.В. Сухарьков та інші.

Відсутність вартісного високовольтного електронного генератора забезпечує доступність технології, електробезпеку та низьку вартість готового продукту: емульсій нерозчинних одна в іншій рідин, очищення медичного інструменту від експлуатаційних забруднень та інше.

Тому розроблення і дослідження ГДВ протиточного типу (ПТТ) та їх застосувань у біомедичній інженерії (БМІ) є актуальним і перспективним напрямком розвитку біомедичної апаратури (БМА).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до плану і завдань науково-дослідних робіт Одеського національного політехнічного університету № 35-60 «Оптимізація параметрів струминних ГДВ з метою інтенсифікації технологічних процесів в акустичних полях, створених цими пристроями» (№ державної реєстрації 0110U007046) та № 102-162 «Хвильові процеси в суцільних середовищах та акустичне обладнання» (№ державної реєстрації 0115U000836), в ході яких здобувач працювала виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності фізичних процесів в рідинній фазі шляхом розроблення моделей, методу та експериментального стенду для дослідження струминних ГДВ.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити **наступні задачі**:

1. Проаналізувати сучасний стан струминних акустичних випромінювачів для застосування в БМА, оцінити їх властивості і недоліки, визначити шляхи подальшого розвитку.

2. Розробити модель нелінійного додаткового поглинання негармонійних імпульсів в рідинному середовищі, отримати функцію питомого поглинання енергії акустичного поля в одиниці об'єму рідини.

3. Експериментально дослідити акустичні поля коротких негармонійних імпульсів у ближній зоні струминних ГДВ та оцінити розміри зони найбільшої активності.

4. Розробити метод оцінки порогу розриву суцільності середовища робочої рідини в звуковому полі створеного струминним ГДВ.

5. Експериментально дослідити метод оцінки порогу розриву суцільності середовища робочої рідини в звуковому полі створеному струминним ГДВ і вплив тиску, більшого за атмосферу, на енергетику та ККД струминних ГДВ при їх застосуванні в БМА.

6. Розробити експериментальний стенд для дослідження струминних ГДВ.

7. Провести апробацію моделі, методу та експериментальні дослідження стенду у Військово-медичному клінічному центрі Південного регіону та Одеському національному політехнічному університеті.

Об'єкт дослідження – акустичні поля і процеси, які згенеровано струминними гідродинамічними випромінювачами в умовах гідростатичного тиску, більшого за атмосферу.

Предмет дослідження – модель, методи, стенд для дослідження струминних гідродинамічних випромінювачів протиточного типу.

Методи дослідження. Для теоретичного дослідження механізму звукоутворення струминними ГДВ використовувалась теорія пружності Кірхгофа-Лява та теорія стійкості й динаміки замкнених оболонок, у яких напруги, що діють на контур, замінено статично еквівалентною системою сил та моментів.

При теоретичному дослідженні згенерованих акустичних полів та нелінійного додаткового поглинання пружних негармонійних хвиль використано метод розкладання щільності енергії в ряд Фур'є й спектральний аналіз.

В експериментальних дослідженнях проводився аналіз частоти основної

гармоніки, осцилограм й спектрів сигналів, їхнього рівня.

Виміри інтенсивності ближнього поля дублювались акустичним методом та за інтенсивністю руйнівної ефективності поверхневого шару зразків за рахунок мікроударного впливу зони розриву суцільності середовища.

Методом фото і швидкісного відео знімання проводилась візуалізація експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримала подальший розвиток математична модель струминного ГДВ ПТТ в частині її можливого застосування стосовно для БМТ, що протікають в рідинній фазі при тиску більшого за атмосферу; експериментально отримано АЧХ струминного ГДВ.

2. Вперше розроблено математичну модель додаткового поглинання негармонійних імпульсів, генерованих струминним ГДВ, за наявності статичного рідинного тиску, більшого за атмосферу, яка дозволяє оцінити теоретично зону руйнівної ефективності поверхневого шару ГДВ ПТТ, підтверджуючи тим самим перевагу полігармонічних акустичних сигналів при їх використанні в біологічних й медичних технологічних апаратах.

3. Вперше теоретично розроблено методику розрахунку розподілу акустичного поля у ближній зоні струминних ГДВ та експериментально визначено розміри зони найбільшої активності цих випромінювачів та розраховано геометричні параметри біомедичного технологічного обладнання на етапі проектування.

4. Удосконалено метод експериментального дослідження акустичних характеристик струминних ГДВ при тиску, більшого за атмосферу, шляхом незалежного регулювання геометричних та гідродинамічних параметрів зануреної струминної оболонки (СО), що дозволило отримати кількісні залежності характеристик випромінюваного сигналу від геометричних та гідродинамічних параметрів ГДВ.

5. Отримав подальший розвиток метод оцінки порогу розриву суцільності середовища робочої рідини акустичним полем, що створено струминним гідродинамічним перетворювачем, шляхом виявлення залежності частоти основного тону акустичного сигналу від статичного тиску, більшого за атмосферу, що підтвердило його кореляцію та узгодженість з іншими аналогічними методами.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено експериментальну методику оцінки порогу розриву суцільності середовища та міцності робочої рідини від частоти сигналу струминного ГДВ ПТТ за тиску, більшого за атмосферу, апробація якої показала її високу кореляцію з результатами, які були отримані іншими авторами.

2. Експериментально доведено ефективність застосування струминних ГДВ в БМТ: очищення медичних інструментів від експлуатаційних забруднень; готування емульсій та гелів; диспергування та емульгування суспензій і визначено подальші перспективи застосування в задачах БМІ струминних ГДВ ПТТ.

3. Розроблено експериментальний стенд для дослідження струминних ГДВ, де взаємоузгоджені давачі звукового тиску, а саме – їх розмір, як, з одного боку, на

порядок менше довжини генерованих пружних хвиль, а з іншого – їх мінімальні розміри обмежені чутливістю до псевдозвукового тиску і забезпечують низьку похибку вимірювань.

4. Результати досліджень впроваджено в навчальному процесі кафедри загальної та медичної фізики при підготовці технічних спеціалістів зі спеціальності 163 – біомедична інженерія в Одеському національному політехнічному університеті при викладанні дисциплін «Біофізика», «Введення в біомедичну інженерію», «Медичні прилади, апарати, системи та комплекси» та інші, що підтверджено відповідним актом.

5. Практичне впровадження результатів роботи виконано у Військовому-медичному клінічному центрі Південного регіону, де було застосовано методику розрахунку акустичних полів струминних ГДВ на стадії проектування біомедичного устаткування та технологію виготовлення водоолійних емульсій та гелів, що дозволило в (2...3) рази зменшити тривалість приготування лікувальних речовин та збільшити з 1 доби до (5...7) діб тривалість розшарування готового продукту, що підтверджено відповідним актом.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати даної дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. В роботах, підготовлених у співавторстві, здобувачу належить наступне: в [1] розроблено лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень акустичних властивостей струминних ГДВ в умовах надмірного статичного тиску; в [2] розроблено модель вимушених коливань циліндричних струминних оболонок при відповідних граничних умовах при наявності гідростатичного тиску більшого за атмосферу; в [3] досліджено тороїдальну вторинну кавітаційну зону, яка утворюється при роботі прямооточного ГДВ з кільцевим соплом й східчастою перешкодою та визначила геометричні параметри вторинного вихору (розрахувала інтенсивність поля поблизу зони звукоутворення); в [4] розглянуто пружний занурений струмінь-оболонку, як модель осесиметричного ГДВ та обчислила основну частоту акустичного сигналу, як функцію властивостей робочої рідини, геометричних та гідродинамічних параметрів струменю; в [5] досліджено геометричні та гідродинамічні властивості випромінювача оптимізованого для глибини занурення; в [6] досліджено напруженість поля в зоні звукоутворення за допомогою параметрів акустичного сигналу та отримала залежності інтенсивності пружних хвиль й питомої потужності для періоду коливань від статичного тиску в рідині; в [7] досліджено звуколюмінісценцію у полі височастотного випромінювача, виявила ефект тривалої після дії низькочастотних звукових коливань на інтенсивність звуколюмінісценції; в [8] досліджено ближнє поле струминного гідродинамічного випромінювача за умов гідростатичного тиску в герметичній ємності та кавітаційну активність випромінювача по ерозії свинцевих зразків, запропонувала практичні рекомендації з використанням даних джерел звуку в емульгуванні нерозчинних рідин, диспергуванні твердих частинок та очищення від забруднень; в [9] досліджено нелінійну взаємодію хвиль, що випромінюються параметричною антеною, по поверхні якої заданий лінійний фазовий розподіл амплітуди, отримала аналітичне рішення, яке описує як ближнє, так й дальнє поле нелінійного

випромінювача; в [10] запропоновано принцип додаткового зменшення інтенсивності пружних імпульсів експонентної форми, які розповсюджуються в рідинних середовищах; в [11] вирішено теоретичну задачу згасання негармонійних імпульсів випромінюваних ГДВ, отримала функцію питомої поглиненої енергії негармонійного акустичного поля в одиниці об'єму рідини; в [12] запропоновано використовувати ГДВ при наявності статичного тиску в робочій ємності для очищення деталей у хімічно-нейтральних рідинах; в [13] досліджено залежності інтенсивності акустичного поля, генерованого ГДВ ПТТ, від геометричних та гідродинамічних параметрів СО й властивостей рідини; в [14] запропоновано принцип збільшення амплітуди вторинної хвилі низької частоти у ближньому полі при заданих частотах (тобто ККД параметричної антени); в [15] запропоновано використовувати струминні акустичні випромінювачі для диспергування парафіну у воді та вирощування штамів дріжджів.

Апробація матеріалів дисертації. Результати досліджень, що включені в дану дисертаційну роботу, були повідомлені на 5 наукових конференціях та симпозіумах: міжнародній науковій конференції «The IVth International Hutsulian Workshop on Mathematical» Theories and Their Applications in Physics & Technology (Київ, 2002 р., форма участі – повна доповідь); міжнародному симпозіумі «6-й міжнародний симпозіум Українських інженерів-механіків у Львові» (Львів, 2003 р., форма участі – публікація тез); всеукраїнських акустичних симпозіумах «КОНСОНАНС» (Київ, 2007 р., 2015 р., форма участі – повна доповідь); першій міжуніверситетській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії» (Київ, 2017 р., форма участі – повна доповідь).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у іноземних виданнях, що включені до наукометричної бази SCOPUS та 1 стаття у виданні України, що включено до наукометричної бази Index Copernicus), 3 статті в інших наукових виданнях з технічних наук, 1 стаття у науково-практичному виданні з біомедичної інженерії, 1 теза доповіді та 4 повні доповіді в збірниках матеріалів конференцій та симпозіумів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів та висновку. Об'єм дисертації – 163 сторінок машинописного тексту, 63 рисунка та 5 таблиць. Також до дисертації додаються: список використаних джерел – 140 найменувань та 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено загальну характеристику роботи, яка підкреслює її актуальність, відповідність науковим програмам, наукову новизну та практичне значення; визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані його мета та задачі, а також вказано особистий внесок автора.

У першому розділі проаналізовані різноманітні типи ГДВ, які широко застосовуються у звукових технологіях (Гартман, Польман, Яновський, Бергман, Константинов, Фрідман, Агранат, Борисов). Розглянуто переваги струминних ГДВ прямооточного й ПТТ для задач звукових технологій (Назаренко, Самойленко).

Проведений аналіз показав, що на сьогоднішній день не існує моделей звукоутворення, які враховували б наявність статичного тиску більш за атмосферу в робочій рідині. Відсутні методики розрахунку, на стадії проектування, згасання генерованих струминними ГДВ негармонійних імпульсів. Також проведено аналіз робіт з коливань занурених СО (Дудзінський, Попов), по динаміці концентрованих вихорів. Проаналізовані недоліки існуючих методів та якості їх застосування.

Другий розділ присвячений, по-перше, теоретичному удосконаленню моделі механізму звукоутворення зануреними СО в умовах статичного тиску більшого за атмосферу в рідині. По-друге, проведено теоретичну оцінку механічних характеристик внутрішньої області ГДВ.

Розглянуто математичну модель струминного ГДВ ПТТ. Конструктивна схема представлена на рис. 1а. Основні елементи такої випромінюючої системи – співвісні кругові сопло **1** та відбивач **2** з лункою на торці. Лунка має оптимальний параболічний профіль, а її діаметр на торці залежить від діаметру прохідного отвору сопла **1**.

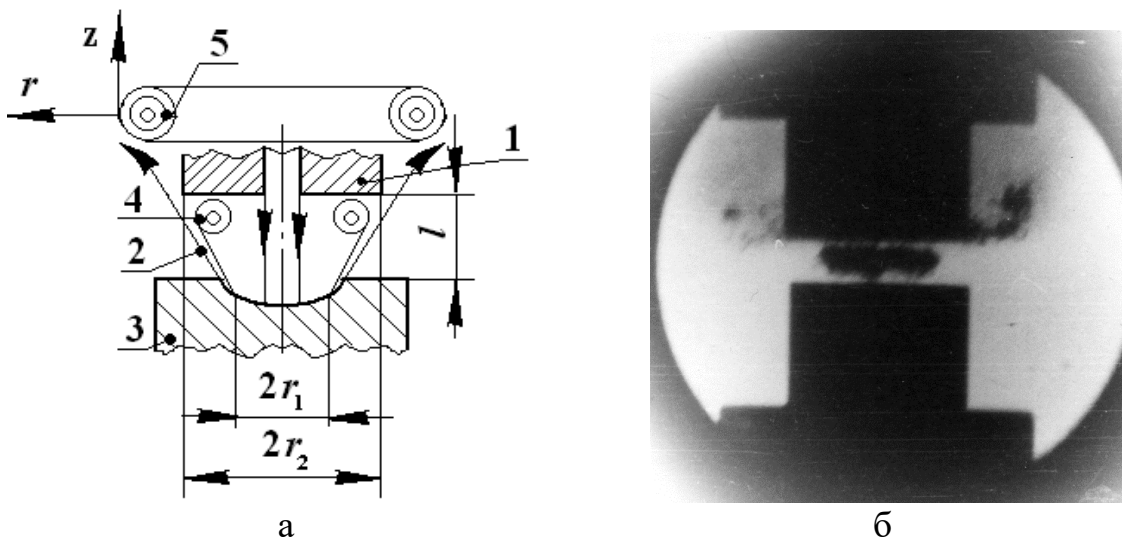


Рисунок 1 – Конструктивна схема струминного ГДВ (а), кадри швидкісної кінозйомки працюючого ГДВ (б): 1 – сопло; 2 – занурена СО; 3 – відбивач; 4 – первинний тороїдальний вихор з розвинутою кавітацією; 5 – вторинний тороїдальний вихор з розвинутою кавітацією

Після натікання на лунку струмінь розвертається, формуючись в усічену конічну СО **3**. У першому наближенні її можна вважати циліндричною. На торці відбивача СО вважається жорстко затисненою. На торці сопла інша гранична умова – відсутність поздовжнього зсуву й деформацій перетину й крутіння. При несиметричному натіканні на зовнішню крайку сопла (прямокутний клин) струмінь кільцевого перетину роздвоюється. Частина потоку рідини йде в навколишній простір, а частина відхиляється до осі симетрії, створюючи первинний кільцевий вихор **4**. Усередині вихору створюється розвинена область розриву суцільності середовища.

Було використано систему рівнянь коливань циліндричної оболонки з відповідними граничними умовами. Шляхом математичних перетворень ця система

рівнянь зводиться до одного диференційного рівняння четвертого ступеня виду:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial z^4} - k^4 w = -F_0, \quad (1)$$

$$\text{де } k = \sqrt[4]{\frac{12(\rho r^2 \omega^2 - E)}{E h^2 r^2}}; \quad F_0 = \frac{12 Q_0}{E h^3}; \quad \frac{E h^3}{12} \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{E h}{r^2} w = Q_0 \quad (2)$$

ω – кругова частота; F_0 – наведена амплітуда питомої зовнішньої сили, що доводиться на одиницю площини внутрішньої поверхні оболонки; k – параметр оболонки; h – товщина оболонки; ρ – щільність матеріалу оболонки; E – модуль пружності; r – середній радіус оболонки.

Загальне рішення неоднорідного диференціального рівняння (1):

$$w(z) = a \cdot \text{ch}(kz) + b \cdot \text{sh}(kz) + c \cdot \cos(kz) + d \cdot \sin(kz) + \frac{F_0}{k^4}. \quad (3)$$

Граничні умови на підставах СО:

$$w(0) = w'(0) = 0; \quad w''(\ell) = w'''(\ell) = 0, \quad (4)$$

де ℓ – довжина СО, тобто відстань між соплом та відбивачем ГДВ (рис. 1а). За таких граничних умов характеристичні параметри СО k_n можуть бути отримані із трансцендентного рівняння:

$$2[\sin(k\ell) \cdot \text{ch}(k\ell) + \cos(k\ell) \cdot \text{sh}(k\ell)] = 0. \quad (5)$$

Основний тон (нижча частота) генерованого звуку при цьому відповідає найменшому кореню $k_0 \ell = 2.365$.

Амплітуда коливань вільного краю оболонки ($z = \ell$) вище резонансу:

$$w_{\text{пром}}^{BЧ}(\ell) = \frac{F_0}{k^4 \sin(k\ell) \cdot \text{sh}(k\ell)} [\sin(k\ell) \cdot \text{sh}(k\ell) + \cos(k\ell) - \text{ch}(k\ell)]. \quad (6)$$

Амплітуда коливань вільного краю оболонки ($z = \ell$) нижче резонансу:

$$w_{\text{пром}}^{HЧ}(\ell) = \frac{F_0}{4 p^4 [\cos(2p\ell) - \text{ch}(2p\ell)]} \cdot [3 \sin(p\ell) \cdot \text{sh}(p\ell) - \\ - 2 \cos(p\ell) \cdot \text{ch}(2p\ell) + \cos(2p\ell) - \text{ch}(2p\ell)]. \quad (7)$$

Таким чином, для розрахунку АЧХ струминних ГДВ можна скористатись виразом (6) нижче резонансу й (7) – вище резонансу, відповідно. При цьому резонансне настроювання ГДВ відповідає частоті основного тону (нижча в спектрі) за формулою:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{k_0^4 h^2 r^2 - 12}{12 \rho r^2}} E. \quad (8)$$

Проведено аналіз отриманих теоретичних результатів. Зокрема, проведено оцінку механічних властивостей внутрішньої області розриву суцільності середовища: щільність й пружність двофазного середовища (рідина з парогазовими

пухирцями), вміст рідини в двофазному середовищі. Також теоретично оцінено вплив геометричних параметрів (середній радіус, довжина та товщина) СО на частоту основного тону генерованого акустичного сигналу та на АЧХ струминних ГДВ.

Проаналізовано вплив властивостей рідини й статичного тиску на частоту основного тону сигналу й на АЧХ даних випромінювачів. Теоретично прогнозовано можливість плавного регулювання частоти звуку в широких межах завдяки регульованому статичному тиску в робочій ємності.

В третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень генерованого звуку струминними ГДВ у зоні розриву суцільності середовища. Для експериментів було розроблено та змонтовано лабораторний стенд, що дозволяє моделювати умови роботи струминних ГДВ в біомедичному технологічному устаткуванні за допомогою регулювання статичного тиску й температури в незбуреному середовищі.

На першому етапі було проведено експерименти по дослідженню залежності частоти генерованого акустичного сигналу від геометричних параметрів й швидкості кільцевого струменя, від гідростатичного тиску й властивостей рідини.

На рис. 2а представлено залежності $f_0(l/r)$ частоти основної гармоніки акустичного сигналу, генерованого струминними ГДВ, від співвідношення довжини й середнього радіусу СО. При цьому встановлено, що частота знижується зі зростанням як довжини, так й середнього радіусу. Проведено дослідження залежності частоти звуку від властивостей рідини й швидкості зануреного струменя.

Було встановлено, що зі зростанням швидкості v струменя частота f_0 генерованого акустичного сигналу суттєво знижується (рис. 2б).

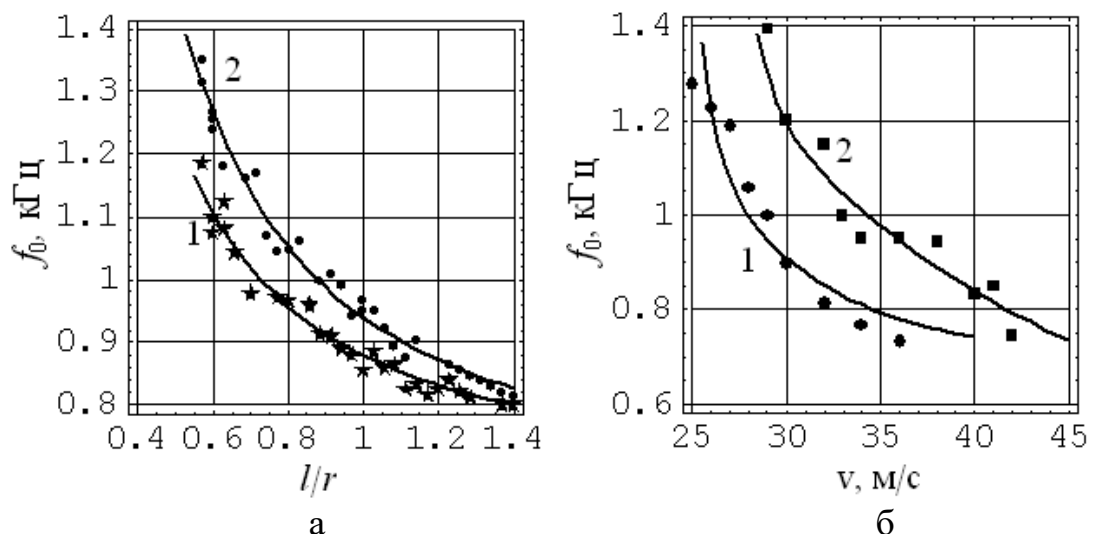


Рисунок 2 – Залежність частоти основного тону від геометричних параметрів СО (а), від швидкості струменя (б): 1 – для води; 2 – для трансформаторного мастила

Це значно виділяє розглянуті джерела звуку у порівнянні з ГДВ інших типів, які генерують звук у відсутності зони розриву суцільності середовища. При занадто низьких значеннях v відсутня кавітація в зоні між соплом й відбивачем (рис.1),

внаслідок чого припиняється процес гідродинамічного звукоутворення. Якщо швидкість потоку значно підвищити, то зона розриву щільності середовища має місце в каналі сопла, внаслідок чого руйнується структура СО й генерується шум з широкою смугою частот. Показано, що одною з особливостей розглянутих ГДВ є обмежений робочий діапазон швидкості струменя в каналі сопла

Також частота основного тону генерованого акустичного сигналу залежить від надлишкового статичного тиску ΔP_{cm} у герметичній ємності. Можливо плавно підвищити частоту f_0 майже на порядок шляхом плавного збільшення статичного тиску (рис. 3а). Зі зростанням ΔP_{cm} збільшується модуль пружності СО та підвищується її власна частота.

При цьому необхідно збільшувати оптимальну швидкість струменя для створення умов розвиненої кавітації всередині СО (рис. 3б). Було досягнуто плавного регулювання частоти сигналу майже на порядок.

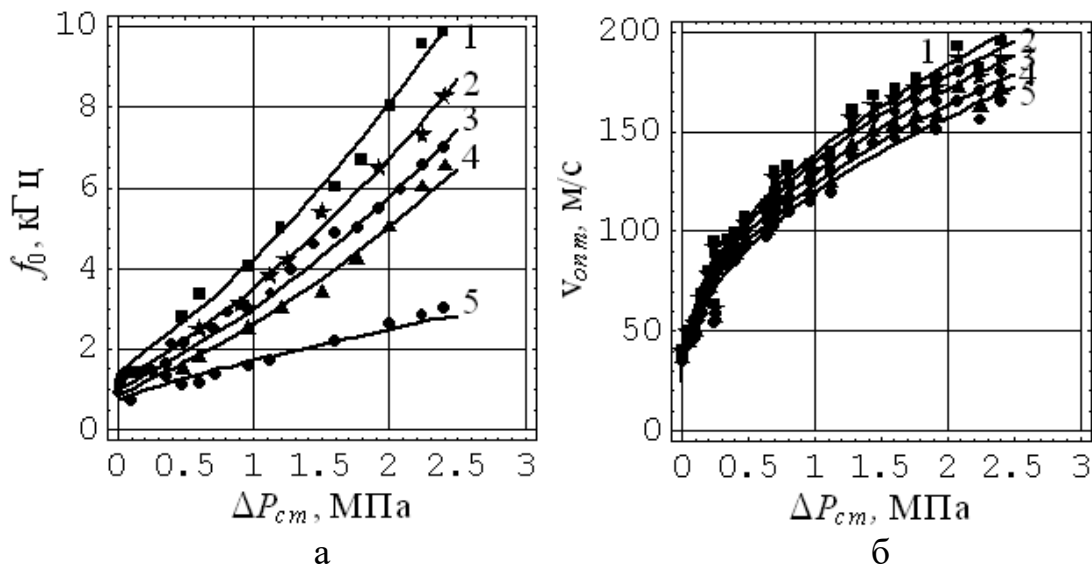


Рисунок 3 – Залежності частоти основного тону звуку (а) та оптимальної швидкості струменя (б) протиточних ГДВ від статичного тиску для різних радіусів меншої підстави СО: 1 – $r_1 = 2.5$ мм; 2 – $r_1 = 3.0$ мм; 3 – $r_1 = 3.5$ мм;

4 – $r_1 = 4.0$ мм; 5 – $r_1 = 4.5$ мм

На рис. 4а точками представлено експериментальні виміри залежності $p|_r(f)$ рівня сигналу від частоти коливань вигину кільцевого струменя, де r – середній радіус СО. Для порівняння на рис. 4а показано відповідні теоретичні залежності (w/w_{max}) амплітуди коливань вигину СО (лінії).

На рис. 4б показано залежність добротності $Q(r)$ випромінювачів від середнього радіуса СО. Добротність ГДВ з ростом середнього радіуса оболонки істотно знижується, наближаючись до значення $Q = (10...12)$.

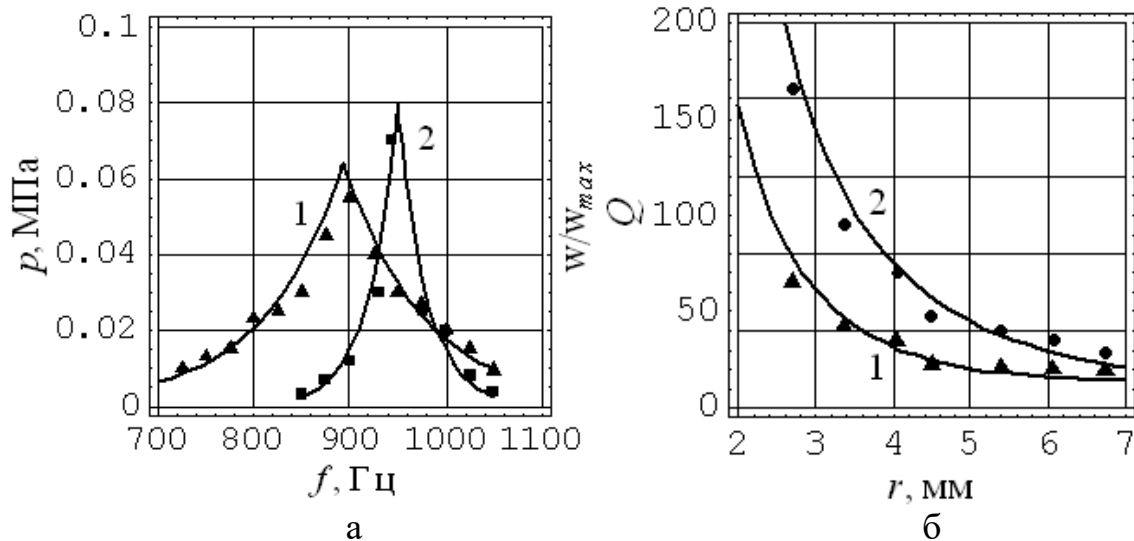


Рисунок 4 – АЧХ (а), добротність (б) ГДВ при роботі: 1 – у водопровідній воді; 2 – в трансформаторному мастилі

У підрозділі 3.4 наведено результати експериментальних досліджень енергетичних характеристик акустичних полів, генерованих зануреними СО. Спочатку було вивчено вплив геометричних параметрів СО на рівень й інтенсивність сигналу. У рідині з більшою в'язкістю (мастило) інтенсивність звуку трохи менше у зв'язку з більшою дисипацією енергії пружних хвиль у внутрішню енергію середовища.

Виявлено також оптимальне співвідношення довжини й радіусу зануреної СО $\ell = (0.9 \dots 1.1)r_1$, при якому генерований сигнал має максимальний рівень, при інших однакових умовах (рис. 5).

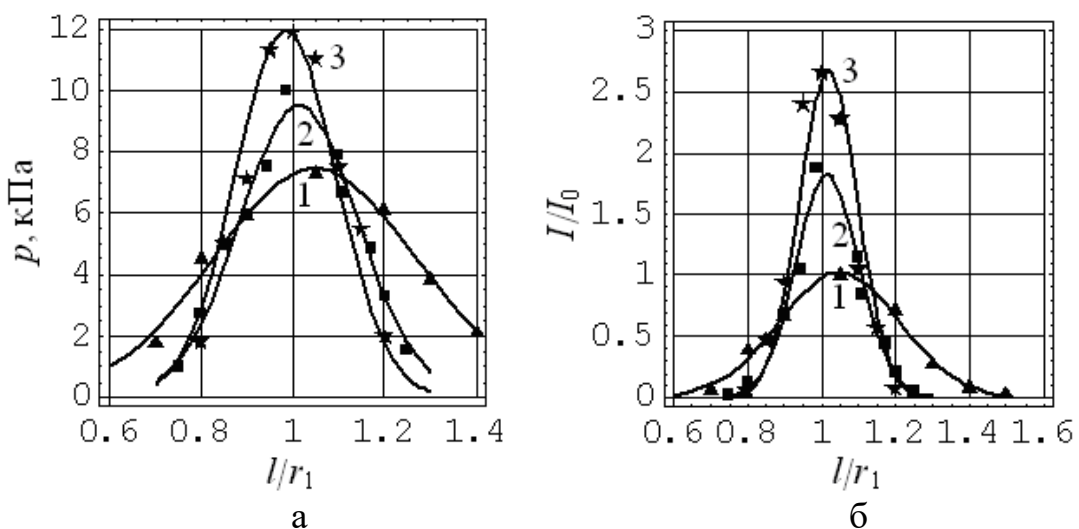


Рисунок 5 – Залежності рівня звуку (а), інтенсивності звуку (б) від співвідношення довжини й радіусу оболонки при радіусах оболонки:
1 – $r_1 = 2$ мм; 2 – $r_1 = 3.5$ мм; 3 – $r_1 = 4.5$ мм

Залежності у відносних одиницях рівня $p/p_{\max}(v/v_{\text{отт}})$ й інтенсивності

$I/I_{\max}(v/v_{\text{онм}})$ акустичних полів від швидкості струменя (рис. 6) мають резонансний характер. Робочі швидкості потоку рідини на виході з сопла протиточних ГДВ обмежені діапазоном значень від $0.8v_{\text{онм}}$ до $1.2v_{\text{онм}}$. При занадто малих значеннях швидкості зникає явище кавітації всередині СО, при надмірно високих швидкостях рідини кавітація виникає в каналі сопла. В обох випадках зникає тональний звук та генерується шумовий сигнал.

На рис. 7а представлені результати дослідження залежностей рівня сигналу $p(\Delta P_{\text{ст}})$, генерованого струминними ГДВ, від надлишкового статичного тиску в рідині. У діапазоні статичного тиску (0...25) атмосфери рівень звуку підвищується майже на порядок, а інтенсивність акустичного поля – майже на два порядки.

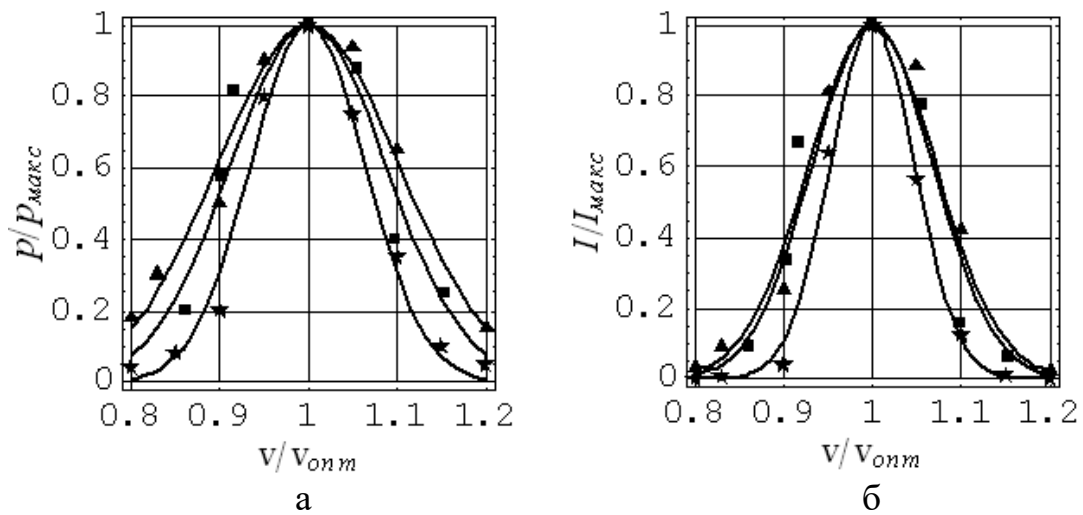


Рисунок 6 – Залежності рівня (а) й інтенсивності (б) акустичного сигналу, від швидкості струменя: \blacktriangle – $r_1 = 2.5$ мм; $v_{\text{онм}} = 33.5$ м/с;

\blacksquare – $r_1 = 3.5$ мм; $v_{\text{онм}} = 36.0$ м/с; $*$ – $r_1 = 4.5$ мм; $v_{\text{онм}} = 38.5$ м/с

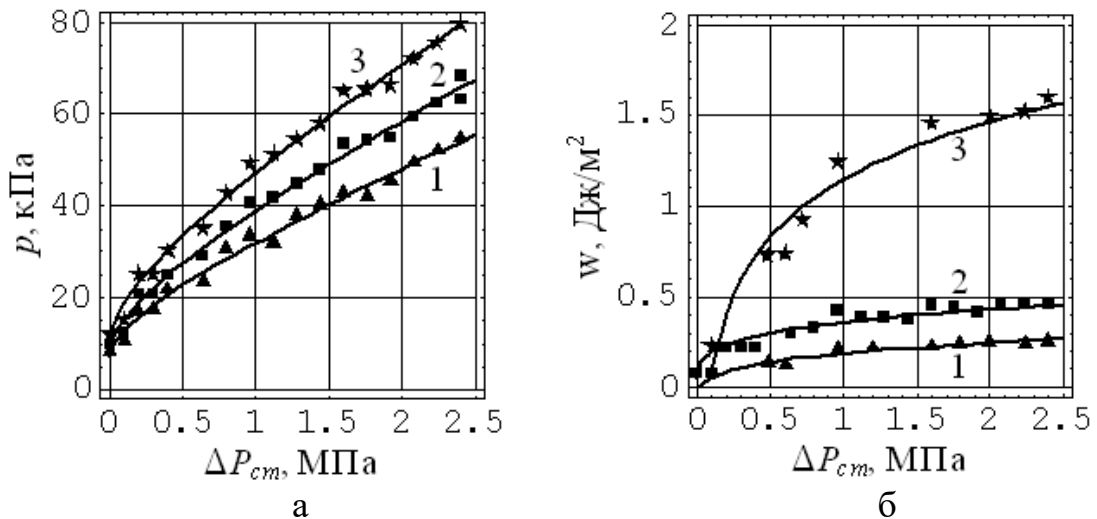


Рисунок 7 – Залежності рівня (а) й питомої енергії (б) звуку від статичного тиску:

1 – $r_1 = 2.0$ мм; 2 – $r_1 = 3.5$ мм; 3 – $r_1 = 4.5$ мм

Проаналізовано залежності питомої енергії ($w = I/f_0$) акустичних полів струминних ГДВ від статичного тиску (рис. 7б). Ріст інтенсивності хвиль у діапазоні $\Delta P_{cm} \leq 1$ МПа обумовлений одночасно зростанням енергії колапсу парових каверн й збільшенням числа колапсів в одиницю часу. При статичних тисках $\Delta P_{cm} > 1$ МПа ріст інтенсивності звуку в основному залежить від лінійного підвищення його частоти.

На рис. 8а показано залежності ККД випромінювача від конусності СО $\eta(\theta; \Delta P_{cm})$ при різних гідростатичних тисках. На рис. 8б показано залежність максимально досяжного ККД струминного ГДВ від надлишкового статичного тиску. При $\Delta P_{cm} \approx 0.2$ МПа можливо досягти значення ($\eta \approx 10.5\%$). Цей результат корисно використовувати при розробці БМТ та встаткування, якщо суттєве значення надано питанням економічності.

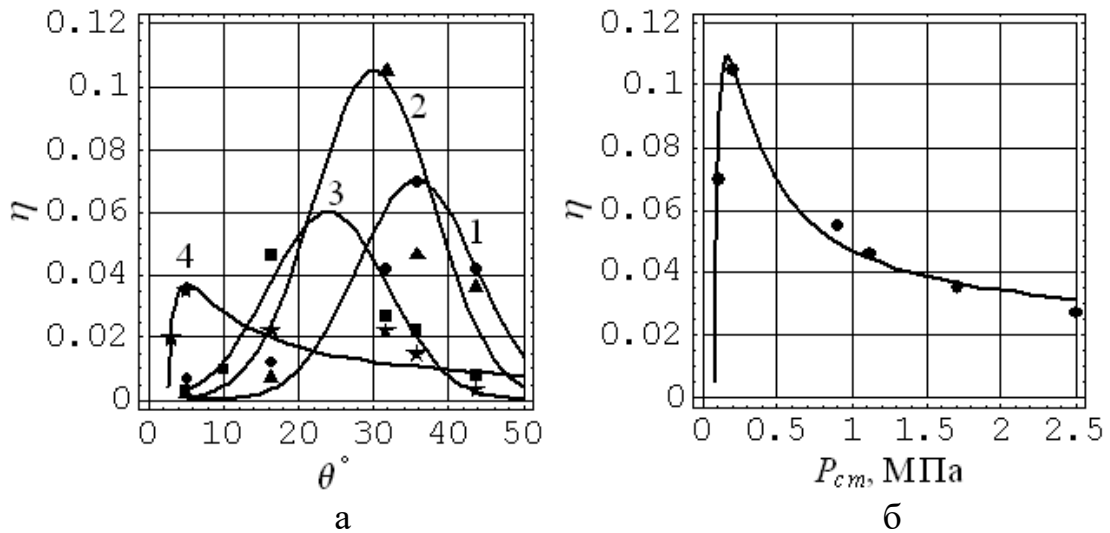


Рисунок 8 – Залежність ККД ГДВ від конусності оболонки при різному статичному тиску (а), залежність максимального ККД від статичного тиску в рідині (б):

1 – $\Delta P_{cm} = 0$; 2 – $\Delta P_{cm} = 0.12$ МПа; 3 – $\Delta P_{cm} = 1.04$ МПа; 4 – $\Delta P_{cm} = 1.6$ МПа

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень ближнього поля струминних ГДВ. Ці джерела звуку генерують негармонійні акустичні сигнали, у спектрі яких крім основної присутні вищі гармоніки (рис. 9). Залежність коефіцієнта поглинання від частоти приводить до того, що при поширенні негармонічних хвиль спектральні складові імпульсу згасають по різному.

У підрозділі 4.1 розроблено модель згасання коротких експонентних імпульсів, генерованих струминними ГДВ. Отримано залежності інтенсивності акустичного сигналу від відстані:

$$I_{\text{кв}}^{\text{сф}}(r) = \frac{p_0^2(\beta_2 - \beta_1)}{2\rho c r^2(\beta_2 + \beta_1)\beta_1^2} \cdot [\beta_1 \Pi_0(\xi_1) - \beta_2 \Pi_0(\xi_2)], \quad (9)$$

де $\Pi_0(\xi) = [1 - \Phi(\xi)]$; $\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp(-\xi^2) d\xi$, $\xi_{1,2} = \beta_{1,2} \sqrt{\alpha_0 r}$, $\alpha_0 = \frac{2\alpha}{\omega^2}$,
 $\Phi(\xi)$ – інтеграл ймовірності; c – швидкість звуку; β_1, β_2 – коефіцієнти крутості фронтів імпульсу; $I_{\text{кв}}^{\text{сф}}(r)$ – інтенсивність сферично хвилі; p_0 – амплітуда імпульсу.

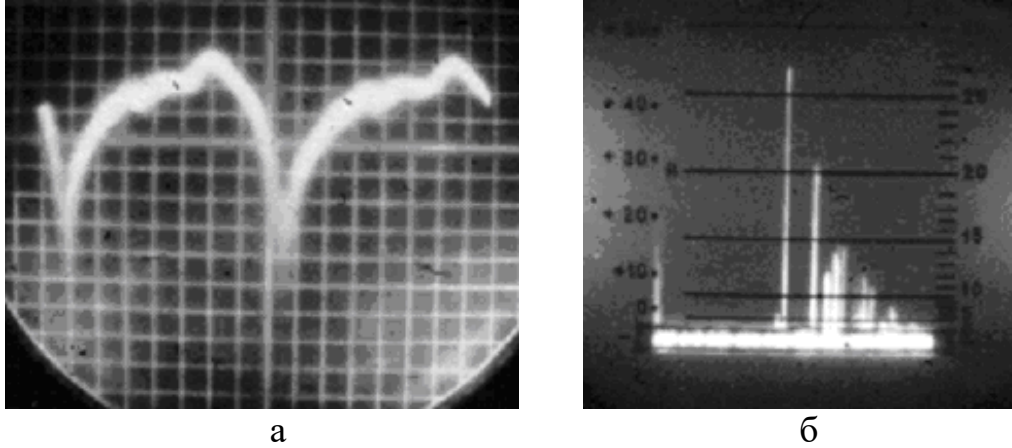


Рисунок 9 – Характерна фонограма (а) й спектрограма (б) акустичного сигналу, генерованого струминним ГДВ

Диференціюванням інтенсивності імпульсу (9) по координаті можна визначити щільність потужності, що поглинається в одиниці об'єму середовища:

$$i_{\text{кв}}^{\text{сф}}(r) = \frac{\partial I_{\text{кв}}^{\text{сф}}}{\partial r} = -\frac{p_0^2 \alpha_0}{2\rho c r^2} \cdot \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \cdot [\beta_1^3 \Pi_1(\xi_1) - \beta_2^3 \Pi_1(\xi_2)], \quad (10)$$

$$\text{де } \Pi_1(\xi) = [1 - \Phi(\xi)] \cdot \exp(\xi^2) - \frac{1}{\sqrt{\pi}\xi}.$$

У підрозділі 4.2 представлені результати експериментальних досліджень ближнього поля струминних ГДВ. Нормовані залежності акустичного тиску $p_{\text{сф}}/p_0(r/\lambda)$, та інтенсивності $I_{\text{сф}}/I_0(r/\lambda)$ полю сферичної хвилі від безрозмірної відстані до границі звукоутворення в довжинах випромінюваних хвиль, представлено на рис. 10. Точки – нормовані результати вимірів. На відстанях, що перевищують п'ять сотих довжини хвилі, має місце звичайне згасання, характерне для гармонічних хвиль малої амплітуди.

У сферично поширюваних хвилях додаткове поглинання інтенсивності залежить від коефіцієнтів крутості фронтів негармонійних імпульсів та статичного тиску в рідині.

Досліджено вплив статичного тиску на нелінійне згасання коротких експонентних імпульсів у сферичних хвилях. Доведено, що при зростанні інтенсивності акустичних хвиль (при високому статичному тиску) розбіжності суттєво зростають.

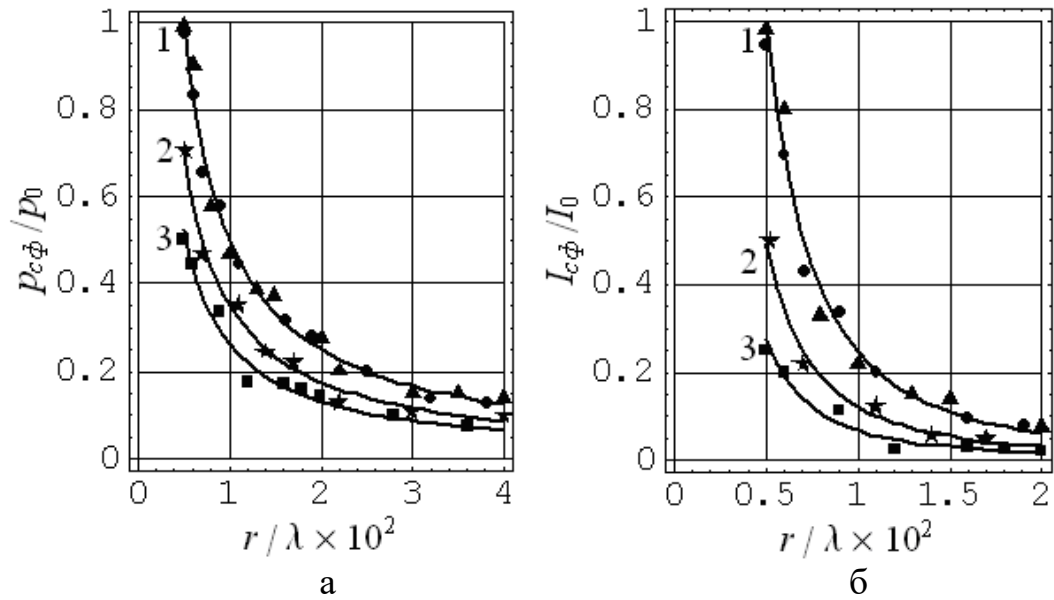


Рисунок 10 – Залежності інтегрального рівня (а) й інтенсивності (б) сферичної хвилі від безрозмірної відстані: ● – $r_1 = 4.5$ мм $\rightarrow f_0 = 0.64$ кГц;

★ – $r_1 = 2.5$ мм $\rightarrow f_0 = 1.5$ кГц; ▲ – $r_1 = 3.5$ мм $\rightarrow f_0 = 0.95$ кГц;

■ – $r_1 = 2.0$ мм $\rightarrow f_0 = 1.7$ кГц

У **п'ятому розділі** наведено експериментальні результати по прикладному застосуванню струминних ГДВ у БМІ. Наведено результати дослідження ерозійної активності у ближньому полі випромінювача. Зразки являли собою свинцеві пластинки розмірами (18×12×1) мм (рис. 12) й фіксувались на відповідній відстані від активної зони звукоутворення за допомогою затиску. Вони орієнтовані щодо вторинного вихру таким чином, щоб руйнуванню піддавався торець пластинки.

Залежність швидкості ерозії $\mu = \Delta m / \Delta t$ (умовно за 1 сек. озвучування) від надлишкового тиску в робочій ємності представлено на рис. 13а. Зі збільшенням статичного тиску в рідині підвищується частота f_0 основного тону генерованого звуку (рис. 13а).



Рисунок 12 – Свинцеві зразки після обробки в ближньому полі ГДВ

Тому має сенс оцінити інтенсивність ерозії – зменшення маси зразка за один період хвили $\delta\mu = \mu/f_0$ (рис. 13б). В діапазоні надлишкового статичного тиску від 0 до 2.5 МПа інтенсивність ерозії підвищується на два порядки.

У підрозділі 5.2 наведено результати досліджень щодо технологічного використання струминних ГДВ. За результатами експериментів ці випромінювачі мають високу ефективність в наступних задачах: очищення деталей від технологічних (притиральні пасти) та експлуатаційних забруднень; емульгування (рис. 14) нерозчинних рідин в воді; диспергування (рис. 15) твердих частинок в рідині.

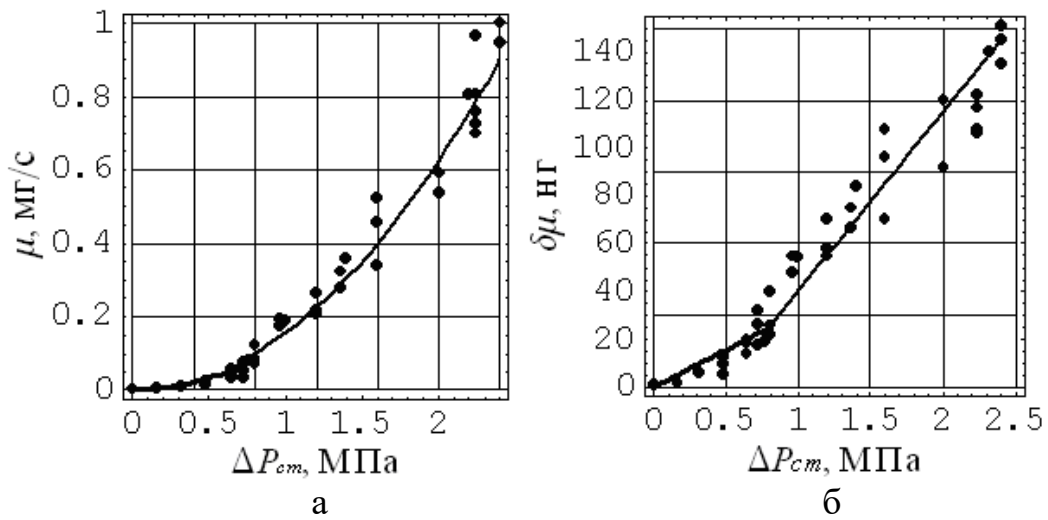


Рисунок 13 – Залежності питомої ерозії (а) й інтенсивності ерозії (б) зразків від статичного тиску в рідині

На рис. 14 та рис. 15: а – після механічного перемішування; б – після емульгування за допомогою струминного ГДВ ($\Delta P_{ст} = 0.8$ МПа).

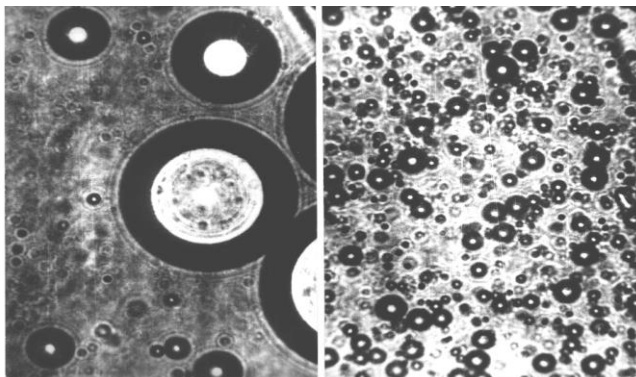


Рисунок 14 – Фото водо-масляної емульсії під мікроскопом

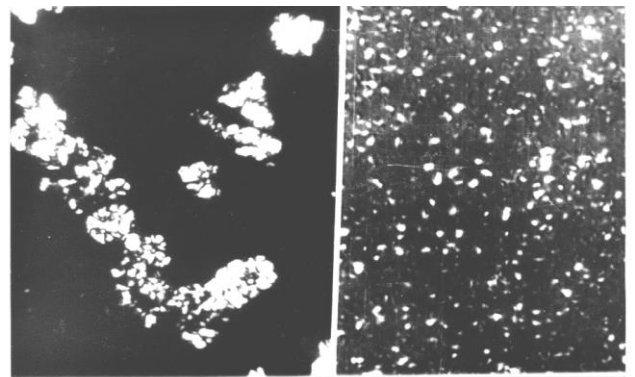


Рисунок 15 – Фото частинок парафіну у воді під мікроскопом

У підрозділі 5.3 наведено результати розробки нового типу акусто-гідродинамічного сенсора порогу кавітації рідини.

У підрозділі 2.1 були отримані вираження резонансної частоти СО. Вирішивши зворотну задачу, можна одержати формули для обчислення міцності рідини на розрив:

$$P_* = -1.1348 \cdot 10^5 - \Delta P_{cm} - \frac{9.2207}{D_1} + 5.6291 \cdot 10^{10} D_1. \quad (11)$$

Експериментальні результати виміру міцності води на розрив мало відрізняються від результатів, які було отримано іншими методами, наприклад, у роботах Блейка. Максимальна похибка запропонованого методу не перевищує 15 %.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить науково обґрунтовані та практичні результати проведених досліджень, які вирішують задачу використання струминних ГДВ для БМТ:

1. Проведений аналіз вітчизняного та зарубіжного літературного контенту за темою дисертації виявив і підтвердив необхідність вирішення теоретичної задачі згасання негармонійних імпульсів випромінюваних ГДВ, отримання функції питомої енергії негармонійного акустичного поля, що поглинається одиницею об'єму рідини; оцінювання розмірів зони найбільшої ефективності технологій очищення, емульгування та диспергування; вдосконалення математичної моделі струминних ГДВ ПТТ стосовно БМТ, для умов тиску, більшого за атмосферу, в органічних рідинах різної в'язкості та щільності тощо.

2. Результати експериментального дослідження акустичних полів коротких негармонійних імпульсів на відстані коротше довжини хвилі струминних ГДВ дозволили розраховувати геометричні параметри біомедичного технологічного обладнання вже на стадії проектування, що на порядок знизило вартість технологічного обладнання та готового продукту, спростило експлуатацію та обслуговування біомедичних технологічних апаратів.

3. Удосконалення методу експериментального дослідження акустичних властивостей струминних акустичних перетворювачів в умовах гідростатичного тиску, більшого за атмосферу, виявило кількісні залежності характеристик випромінюваного сигналу від геометричних та гідродинамічних параметрів даних пристроїв і довело, що при підвищенні тиску в робочій ємності та забезпеченні відповідної швидкості потоку можливо збільшити ККД ГДВ в півтори рази.

4. Подальший розвиток методу для експериментального оцінювання порогу розриву суцільності середовища, створеного ГДВ ПТТ, по виміряним залежностям частоти основного тону акустичного сигналу від статичного тиску, більшого за атмосферу, дозволив отримати експериментальні залежності, які корелюють та добре узгоджуються з результатами, отриманими іншими методами.

5. Розроблення математичної моделі додаткового поглинання негармонійних імпульсів дозволило оцінити зону руйнівної ефективності поверхневого шару ГДВ ПТТ, що в свою чергу, сприяло отриманню експериментальних АЧХ струминного ГДВ.

6. Безумовне дотримання умов точкового приймача, яке було досягнуто шляхом взаємоузгодження давачів звукового тиску в частині визначення їх розмірів,

зумовлених, з одного боку – довжиною генерованих пружних хвиль, а з іншого – чутливістю до псевдозвукового тиску, дозволило створити експериментальний стенд для дослідження струминних ГДВ.

7. Розроблення лабораторного стенду й теоретико-методичних та практичних рекомендацій проведення наукових досліджень з використанням акустичних технологій в умовах розвинутої кавітації при надлишковому статичному тиску, які використовуються в освітньому процесі в Одеському національному політехнічному університеті при викладанні дисциплін «Біофізика», «Введення в біомедичну інженерію», «Медичні прилади, апарати, системи та комплекси» та інші зі спеціальності 163 – біомедична інженерія, що підтверджено відповідним актом впровадження.

8. Розроблення для Військово-медичного клінічного центру Південного регіону методики розрахунку акустичних полів струминних ГДВ для технологій виготовлення водоолійних емульсій та гелів дозволило в (2...3) рази зменшити час приготування зазначених речовин при одночасному збільшенні з 1 доби до (5...7) діб часу розшарування готового продукту, що підтверджено відповідним актом.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях

1. Manicheva N.V. Optimization of Parameters of a Broadband Acoustic Source Under Static Overpressure / Y.M. Dudzinskii, N.V. Manicheva, A.A. Nazarenko // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2004. – P. 477-488. (*Іноземне наукове фахове видання, що включено до науко метричної бази SCOPUS*).

Здобувачем досліджено геометричні та гідродинамічні властивості випромінювача оптимізованого для глибини занурення.

2. Manicheva N.V. Power characteristics of the uniflow hydrodynamic sound source under the conditions of hydrostatic pressure / Yu.M. Dudzinskii, A.O. Sukhar'kov, N.V. Manicheva // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2006. – P. 278-285. (*Іноземне наукове фахове видання, що включено до науко метричної бази SCOPUS*).

Здобувачем досліджено напруженість поля в зоні звукоутворення за допомогою параметрів акустичного сигналу та отримано залежності інтенсивності пружних хвиль й питомої потужності для періоду коливань від функцій статичного тиску в рідині.

3. Маничева Н.В. Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений / Ю.М. Дудзинский, Н.В. Маничева, А.А. Назаренко // Акустичний вісник. – 2001. – 4, №2. – С. 38-46.

Здобувачем запропоновано модель вимушених коливань циліндричних СО при відповідних граничних умовах при наявності гідростатичного тиску більшого за атмосфер.

4. Маничева Н.В. Энергетика прямогоного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / Ю.М. Дудзинский, Н.В. Маничева, А.О. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2004. – 7, №1. – С. 44-49.

Здобувачем досліджено тороїдальну вторинну кавітаційну зону та визначено геометричні параметри вторинного вихора (розраховано інтенсивність поля поблизу зони звукоутворення).

5. Манічева Н.В. Модель прямогоного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою / Ю.М. Дудзінський, Н.В. Манічева, А.О. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2004. – 7, №3. – С. 48-51.

Здобувачем запропоновано модель осесиметричного ГДВ та обчислено основну частоту акустичного сигналу, як функції властивостей робочої рідини, геометричних та гідродинамічних параметрів струменю.

6. Маничева Н.В. Эрозионная активность в ближнем поле струйного гидродинамического излучателя / А.А. Бондарь, В.В. Витков, Ю.М. Дудзинский, Н.В. Маничева // Электроника и связь. – 2013. – № 2. – С. 91-96. (Наукове фахове видання України, що включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Здобувачем досліджено кавітаційну активність ГДВ по ерозії свинцевих зразків та запропоновані практичні рекомендації з використанням даних джерел звуку в емульгуванні нерозчинних рідин, диспергуванні твердих частинок та очищення від забруднень.

Статті у інших виданнях України

7. Маничева Н.В. Кавитационная эрозия при избыточном статическом давлении / Ю.М. Дудзинский, Н.В. Маничева, А.А. Назаренко // Труды Одесского политехнического университета – 2001. – Вип. 3(15). – С. 114-118.

Здобувачем розроблено лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень акустичних властивостей струминних ГДВ в умовах надмірного статичного тиску.

8. Манічева Н.В. Підвищення ефективності кавітації у двочастотному ультразвуковому полі / Н.В. Манічева, Ю.М. Дудзінський, В.В. Вітков // Машинознавство. – 2010. – №5. – С. 45-47.

Здобувачем досліджено звуколюмінісценцію у полі високочастотного випромінювача та виявлено ефект тривалої після дії низькочастотних звукових коливань на інтенсивність звуколюмінісценції.

9. Маничева Н.В. Акустическое поле параметрической антенны с фазовым распределением по ее апертуре / Ю.М. Дудзинский, Н.В. Маничева, А.А. Бондарь // Акуст. вісн. – 2015. – 17, № 4. – С. 40-47.

Здобувачем досліджено параметричний випромінювач у вигляді антени, по поверхні якої заданий лінійний фазовий розподіл амплітуди, отримано аналітичне рішення, яке описує як ближнє, так й дальнє поле випромінювача.

10. Манічева Н.В. Струминні акустичні випромінювачі для біотехнологій. / Ю.М. Дудзінський, Н.В. Манічева, А.В. Жукова // Журнал «Біомедична інженерія». – м. Київ, Україна – № 4, квітень 2017. – С. 33-36.

Здобувачем запропонован принцип зменшення інтенсивності пружних імпульсів експонентної форми, які розповсюджуються в рідинних середовищах.

Матеріали конференцій та симпозіумів

11. Manicheva N.V. Axial-Symmetric Hydrodynamic Radiators Use for Fluid Cavitation Threshold Measurment / Yu.M. Dudzinski, N.V. Manicheva, O.V. Suharkov // The IVth International Hutsulian Workshop on Mathematical Theories and Their Applications in Physics & Technology, 28 October – 02 November 2002: The materials of. Conf. – Kyiv: TIMPANI, 2002. – P. 275-286.

Здобувачем вирішена теоретична задача згасання негармонійних імпульсів випромінюваних ГДВ, отримана функція питомої поглиненої енергії негармонійного акустичного поля в одиниці об'єму рідини.

12. Маничева Н.В. Энергетика затопленных конических струйных оболочек / Н.В. Маничева // КОНСОНАНС – 2007, 25-27 вересня 2007 р.: Всеукр. акустичний симп.: зб. праць. – К., 2007. – С. 176-182.

Здобувачем досліджена залежності інтенсивності акустичного поля, генерованого ГДВ ПТТ, від геометричних та гідродинамічних параметрів струминної оболонки й властивостей рідини.

13. Маничева Н.В. Нелинейное взаимодействие волн в акустических пучках с поперечным фазовым распределением / Ю.М. Дудзінський, Н.В. Маничева, А.А. Бондарь // Акустичний симпозіум «Консонанс-2015» – 2015. – С. 84-89.

Здобувачем запропоновано принцип збільшення амплітуди вторинної хвилі різних частот у ближньому полі при зладнаних частотах (ККД параметричної антени).

14. Маничева Н.В. Струминні акустичні випромінювачі для біотехнологій. / Ю.М. Дудзінський, Н.В. Маничева, А.В. Жукова // Перша міжуніверситетська науково-практична конференція з міжнародною участю «Сучасний стан та перспективи біомедицинської інженерії» 26-27 квітня 2017 року, м. Київ, Україна – № 4, квітень 2017. – С. 33-36.

Здобувачем запропоновано використовувати струминні акустичні випромінювачі для диспергування парафіну у воді та вирощування штамів дріжджів.

15. Маничева Н.В. Кавітаційна ерозія металу в потужних акустичних полях за умов надмірного статичного тиску / Ю.М. Дудзінський, Н.В. Маничева // 6-й міжнар. симп. Українських інженерів-механіків у Львові, 21-23 травня 2003 р.: тези доп. – Львів, 2003. – С. 159.

Здобувачем запропоновано використовувати гідродинамічні випромінювачі при наявності статичного тиску в робочі ємності для очищення деталей у хімічно-нейтральних рідинах.

АНОТАЦІЯ

Маничева Н.В. Струминні акустичні випромінювачі для біомедицинської апаратури. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерство освіти і науки України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена дослідженню характеристик гідродинамічних випромінювачів (ГДВ) протиточного типу (ПТТ) при гідростатичному тиску, більше за атмосферу, та перспектив їх застосування для біомедичної апаратури (БМА).

Експериментально досліджено вплив статичного тиску на енергетику та ККД розглянутих ГДВ, що використовуються у біомедичних апаратах. Доведено, що завдяки підвищенню тиску в робочій ємності та відповідної швидкості потоку, можливо в півтори рази збільшити ККД цих пристроїв. Це важливо для поточного виробництва.

Удосконалено математичну модель струминних ГДВ ПТТ для БМА, що розглядається при гідростатичному тиску до 24 атмосфери включно.

Експериментально досліджені поля поблизу елементу звукоутворення ГДВ ПТТ, що дозволило виявити характер функції ефективності руйнування поверхонь твердих тіл при використанні струминних перетворювачів. Проведені дослідження показали перспективу використання струминних акустичних перетворювачів для застосування їх у процесах очищення медичних інструментів від технологічних та експлуатаційних відкладень, емульгування, диспергування для біотехнологій та фармакології.

Ключові слова: амплітудно-частотна характеристика, диспергування, емульгування, нелінійне згасання імпульсів, струминний гідродинамічний випромінювач.

АННОТАЦИЯ

Маничева Н.В. Струйные акустические излучатели для биомедицинской аппаратуры. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.17 – биологические и медицинские приборы и системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерство образования и науки Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена исследованию характеристик гидродинамических излучателей (ГДИ) противоточного типа (ПТТ) при гидростатическом давлении, большем атмосферного, и перспектив их применения для биомедицинской аппаратуры (БМА). Также проведено исследование влияния негармоничных звуковых волн конечной амплитуды на физико-механические явления и эффекты, имеющие место в жидкой среде. Доказана перспектива использования этих физических эффектов в БМА соответствующего направления и в некоторых пищевых и биотехнологиях.

Проанализированы проблемы, возникающие при использовании электроакустических преобразователей магнитострикционного или пьезоэлектрического типа в БМА технологического назначения: для обработки медицинских инструментов и приборов, для эмульгирования жидких или аморфных сред в дистилляте и диспергирования твердых материалов, с целью повышения эффективности фармацевтических и биотехнологий.

Показаны перспективы применения в задачах БМИ струйных ГДИ ПТТ, по сравнению с другими акустическими преобразователями. Они имеют перспективы

повышения коэффициента полезного действия (КПД) за счет подбора соответствующих значений давления в рабочей емкости и скорости потока жидкости. Удобство для пользователей прежде всего связано с простотой в эксплуатации, их использование дает возможность обработки большого объема рабочего продукта с одновременным уменьшением технологического времени.

Научная новизна полученных теоретических результатов заключается в решении задачи дополнительного поглощения негармоничных импульсов в расходящихся волнах и оценки функции пространственной плотности мощности, поглощенной в единице объема рабочей среды. Полученные характеристики интенсивности звуковых волн и удельной поглощенной интенсивности, как функции акустического давления, характеристик жидкости и расстояния от элемента звукообразования струйного ГДИ. Часть поглощенной в жидкости энергии расходуется на увеличение количества паровых и парогазовых микропузырьков, что позволяет на практике увеличить зону наибольшей активности струйных ГДИ ПТТ.

Научная новизна полученных практических результатов заключается в проведении экспериментальных исследований акустических полей коротких негармоничных импульсов на расстоянии менее длины волны генерируемого ГДИ акустического сигнала, исследований акустических характеристик струйных акустических излучателей в условиях статического давления выше атмосферного в технологическом устройстве. По результатам этих исследований были оценены размеры области наибольшей активности этих излучателей. Эти результаты позволяют рассчитывать геометрические параметры биомедицинского технологического оборудования во время разработок.

Экспериментально исследовано влияние статического давления на энергетику и КПД рассматриваемых ГДИ, используемых в биомедицинских аппаратах. Доказано, что благодаря повышению давления в рабочей емкости и соответствующей скорости потока, возможно в полтора раза увеличить КПД этих устройств, что является важным для поточного производства.

Усовершенствована математическая модель струйных ГДИ ПТТ для БМА, что рассматривается при гидростатическом давлении до 24 атмосфер включительно.

Экспериментально исследованы поля вблизи элемента звукообразования ГДИ ПТТ, что позволило выявить характер функции эффективности разрушения поверхностей твердых тел при использовании струйных преобразователей.

Проведенные исследования показали высокую эффективность использования струйных акустических излучателей для применения их в процессах очистки медицинских инструментов от технологических и эксплуатационных загрязнений, эмульгирования, диспергирования для биотехнологий и фармакологии.

В диссертационной работе рассматриваются новые учебно-методические и практические рекомендации, которые внедрены в учебный процесс в Одесском национальном политехническом университете. Разработан лабораторный стенд, который используется в учебном процессе для выполнения лабораторных работ студентами, аспирантами, соискателями и научными сотрудниками ОНПУ в ходе проведения научных исследований с использованием акустических технологий в

условиях расширенной кавитации при статическом давлении большем атмосферного.

Разработана система комплексных расчетов акустических полей для биомедицинского оборудования и технология изготовления эмульсий и гелей с использованием струйных ГДИ ПТТ. Осуществлено производственное испытание результатов исследований в Военно-медицинском клиническом центре Южного региона. Использование результатов диссертационной работы позволило создать экспериментальные образцы вспомогательного технологического оборудования.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, диспергирование, эмульгирование, нелинейное затухание импульсов, струйный гидродинамический излучатель.

ABSTRACT

Manicheva N.V. Jet Acoustic Radiators for Biomedical Apparatus. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.11.17 – biological and medical devices and systems. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorskyi Kiev Polytechnic Institute” Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to research of characteristics of hydrodynamic radiators (HDR) of countercurrent type at hydrostatic pressure, more than atmosphere, and prospects of their application for biomedical equipment (BME).

The influence of static pressure on energy and the efficiency of HDR s used in biomedical devices is experimentally investigated. It is proved that due to the increase of pressure in the working capacity and the corresponding flow velocity, it is possible to increase the efficiency of these devices by one and a half times. This is important for current production.

The mathematical model of jet HDR of countercurrent type for BME, which is considered at hydrostatic pressure up to 24 atmospheres inclusively, is improved.

Fields experimentally investigated near the sound-forming element of HDR of countercurrent type, which allowed to reveal the character of the function of the efficiency of the destruction of surfaces of solids using jet transducers. The conducted studies have shown the prospect of using jet acoustic transducers for their use in the process of cleaning medical instruments from technological and operational deposits, emulsification, dispersion for biotechnology and pharmacology.

Keywords: amplitude-frequency characteristic, dispersion, emulsification, nonlinear fading of impulses, jet hydrodynamic radiators.